レーザーオリジナル

レーザー加工形状の数値解析(第4報)

—レーザー加工における溶融・除去のメカニズム—

渡部 武弘*・吉田喜太郎*・志茂主税**

(1987年12月2日 受理)

Numerical Calculation of Shapes Machined with
Pulsed YAG Laser (4th Report)

— Mechanism of melt and removal in laser machining —

Takehiro WATANABE*, Yoshitaro YOSHIDA* and Chikara SHIMO**

(Received December, 2, 1987)

In our former papers, machinability of various metals and machining phenomena were investigated to understand the laser machining mechanism. In this paper, machining processes and mechanism of material removal were further investigated to calculate profiles machined with a pulsed YAG laser. The obtained results are as follows.

(1) There are four types of machining processes, namely, heat conduction type, melting only type, mixed type of melt and removal, and removal only type. Some type of the processes will actually take place according to the power density and the irradiated time of laser beam and this information can be used for deciding the machining conditions. (2) The power density of irradiated laser beam decreases with increasing the machined depth and the reduction ratio is estimated by the experimental results of machinability. (3) There are two types of material removal in laser machining; one is the removal as melt and the other is the removal as vapor. And the vapor ratio which is defined as the fraction removed as vapor was estimated from the experimental result.

Key Words: Laser machining, Machining process, Mechanism, Keyhole, Vapor ratio.

1. 緒 言

レーザー加工を汎用的なものにするとともに、加工条件の設定を容易にするためには、正確な加工メカニズムや現実に合致したシミュレーション

が可能でモデルを作製する必要がある。ところが、レーザー加工時には高温を伴う複雑な現象が高速で発生するため、現実に合致したシミュレーションを展開できるような加工メカニ

* 千葉大学工学部機械工学科 (〒260 千葉市弥生町1-33)

** 千葉工業大学経営工学科 (〒275 習志野市津田沼2-17-1)

* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiba University (1-33, Yayoi-cho, Chiba, 260)

** Department of Management Engineering, Chiba Institute of Technology (2-17-1, Tsudanuma, Narashino, 275)

ズムや加工モデルについての研究論文は少ない^{1,2)}。しかし、次に示すような限られた分野での定性的な加工モデルについてはいくつか提案されている。

最近、広範囲に実用化されているレーザー切断ではガス吹付けによる溶融金属の流れを基に切断機構が検討されている^{3,5)}。吉田ら⁶⁾はキーホールの考え方を導入し、レーザー溶接との関連で深溶け込み機構を説明している。一方、穴あけ加工においては材料の蒸発現象が加わり、複雑化するため、詳細には検討されていない。

そこで前報までは、加工メカニズム解明の基礎資料を得るために、各種金属の加工特性⁷⁾やレーザー加工時の諸現象⁸⁾について検討した。本報では、加工形状を数値解析により求めるため、前報までに得られた結果を総合し、加工プロセスを分析するとともに、材料除去のメカニズムについて検討した。

2. 加工プロセスの分析

レーザー加工においては、材料物性値の温度変化、溶融・気化などの相変化、ブルームによるレーザー光の吸収・散乱などの非常に複雑な現象を伴うため、表面加熱領域からプラズマ発生領域までの全加工領域を統一した形で論じることが困難なように思われる。ところが、レーザー加工現象はパワー密度により大きく異なることが知られている。

そこで、低パワー密度から高パワー密度までの加工プロセスを熱伝導プロセス、溶融プロセス、溶融と除去の混合プロセス、及び、除去プロセスの四つの領域に分類して検討することとした。

最近、表面処理との関連で、相変化を伴わない熱伝導問題については多くの研究がある。本研究は溶融・除去といった相変化を含んだ加工を対象としているが、相変化が起こるまでの熱伝導プロセスは、熱伝導差分式により解析することができる。この場合、実際に使用したレーザー光の特性を定量化するとともに、材料物性値の温度依存性を考慮している。それらの詳細

について続報で報告する。

2.1 溶融プロセス

レーザー光は金属材料中にはほとんど浸透せず、試料表面で熱源となる。表面処理などの低パワー密度領域から徐々にパワー密度を増加していくと、試料表面は溶融し始め、溶融層が形成される。Fig.1はAlの試料にノーマルパルス発振のYAGレーザー光を1パルス照射した場合に形成される溶融層と除去層の形状の一例を示したものである。この図からもわかるように、溶融層の形成には2種類の形成プロセスが考えられる。一つは熱源が試料表面に固定され、熱伝導により溶融層が成長するプロセスである。同図において、パワー密度を $3.3\text{MW}/\text{cm}^2$ としてレーザー照射した場合、照射時間が 0.55ms 以下で形成される溶融層がこれに相当し、これらが熱伝導型溶融層と呼ばれているものである。

もう一つは、溶融層中にビーム孔が形成され、熱源が深さ方向に移動しながら溶融層を形成していくプロセスである。同図において、パワー密度が $3.3\text{MW}/\text{cm}^2$ で照射時間が 0.7ms 以上の場合や、パワー密度が $6.5\text{MW}/\text{cm}^2$ で照射時間が 0.4ms 以下で形成される溶融層がこれに相当し、これらが穿孔型溶融層と呼ばれているものである。

熱伝導型溶融層の形成プロセスをモデル化してFig.2に示す。同図は低パワー密度でレーザー光を照射した場合で、ビーム強度の大きいビーム中心付近から溶融し始め、時間の経過とともに溶融層は半径方向と深さ方向に広がっていく。時間が経過すると同図(c)に示すように、試料表面中心部にわずかに蒸発が起り、蒸発圧力が発生する。しかし、その蒸発圧力は小さく、熱源点を試料表面から内部へ移動させるほどのものではない。

このような加工状態ではFig.3に示すような渦模様がしばしば観察される。同図(a)の渦部分を拡大したのが同図(b)で対流状態が観察される。渦流はほぼ左右対称に形成されている。Fig.4はこの渦流の形成状態を模式的に示した

Fig.1 Sectional features of workpiece irradiated in various conditions.

ものである。パワー密度の大きい表面中心部での温度が周辺部より高いため、中心部の表面張力より周辺部の表面張力が大きくなり、表面張

力流が発生する。一方、溶融層外周部では固相面での冷却により、比重が増加し、溶融層下方へ移動する。これら二つの流れにより、溶融層外周部に渦流が形成されている。一方、Fig.5はAl板とCu板を重ね合せ、Al側からレーザー光を照射した場合の溶融部の断面状態を示したものである。境界部付近ではAlとCuの溶融金属がよく混合されている状態が観察される。

このような熱伝導型溶融層を形成する低パワー密度範囲では以下のような用途が考えられる。熱伝導型で形成された薄い溶融層中には、渦流や乱流などが発生しているため、表面に塗布した他の金属粉末を同時に溶融して、合金化する場合には異種金属がよく混合され、均一な合金層が形成されるものと思われる。この場合、焦点はずしにより低パワー密度化するとともに、スポット径を大きくし、広い溶融層を形成すると有利である。

Fig.6は穿孔型溶融層形成のプロセスをモデ

Fig.2 Change with time of melt zone in heat conduction type.

Fig.3 Generation of convection in melt zone of heat conduction type.

Fig.4 Mechanism of convection generation.

ル化したものである。表面中心での蒸発量の増加により、蒸発圧力も大きくなり、溶融層中心部に同図(a)のようなくぼみ形成される。すると、同図(b)のように傾斜した溶融層表面でレーザー光は反射され、中心部に集光される。

Fig.5 Mixed appearance of metals melted with laser beam.

集光されたレーザー光により中心部の蒸発は更に活発となり、同図(c)のようにビーム孔が形成される。レーザー光は溶融壁面での多重反射によるWall-Focusing⁹⁾効果により、更に中心深部に集光される。これにより、ビーム孔深さは増加し、同図(d)のように熱源点も深さ方向へ移動する。

Fig.6 Change with time of melt zone in beam hole type.

- F1 ; Vapor pressure
 F2 ; Reaction force by vapor
 F3 ; Hydraulic pressure
 F4 ; Closing pressure by surface tension

Fig.7 Mechanism of beam hole generation.

ここで、ビーム孔に作用する力を考えてみる。
 Fig.7はビーム孔に作用する力を概念的に示し

たものである。

$F1$: 被加工物の蒸発による蒸気圧力

$F2$: 被加工物の蒸発による反発力

$F3$: 被加工物の溶融による静水圧力

$F4$: 被加工物の溶融による表面張力

溶融表面に働く推力 F は $F1 + F2$ で示され、溶融表面での蒸発が活発になるとともに、この推力は大きくなり、溶融部に穿孔作用が働くものと考えられる。穿孔作用が成立するための条件は、推力 F が溶融表面を引き上げる力 $N (= F3 + F4)$ よりも大きいことである。すなわち、 $F1 + F2 > F3 + F4$ でなければビーム孔は形成されない。

以上のように、ビーム孔の作用により熱源点は材料内部へ移動し、深い溶融層が形成される。この深溶け込み現象を利用することにより、厚板の溶接が可能になる。

2.2 溶融と除去の混合プロセス

前項で示した穿孔型溶融層では、金属の気化によって発生する蒸気圧力は溶融金属を押し広げ、レーザー光の導光路としての役割を果たすことはできるが、それをスブラッシュすることはできない。しかし、パワー密度を増加していくと、気化による蒸気圧力が増加し、溶融金属の一部を吹き飛ばし、除去層を形成し始める。

Fig.8はこの状態を示したものである。形成された溶融層の全てを除去するのに十分な蒸気圧力を発生し得ない状態で、この領域での加工状態は不安定となり、加工の再現性は低下する。Fig.1において、パワー密度が 6.5 MW/cm^2 で照射時間が 0.55 ms 以上の場合がこれに相当す

Fig.8 Change with time of melt and removed zones.

る。前報の加工現象の観察でも述べたように、溶融金属中のビーム孔はその径の拡大、縮小を繰り返しながら進行する。そして、表面張力が小さく、熱拡散率の大きいAlのような材料では同図(b)に示すように、ビーム孔が完全に閉じられた状態も存在する。そのため、Fig.1にも示されているように、溶融層中に多くのポロシティが残留する領域でもある。

2.3 除去プロセス

溶融層と除去層の混合プロセス領域から更にパワー密度を上げると、蒸気圧力が非常に大きくなり、形成された溶融金属層は全て除去され、除去層のみの加工状態となる。Fig.9はその加工状態を示したものである。溶融層中にビーム孔が形成され、同図(b)のようにビーム孔先端部での蒸気圧力が大きくなると、その圧力により周囲の溶融層が除去され、同図(c)のように除去層が形成される。ここで、同図(b)の状態を詳細に示したのがFig.10である。レーザーの中心部での強度が大きいこと、溶融壁面での反

Fig.9 Change with time of removed zone.

Fig.10 A model in splashing of melt zone.

射による Wall-Focusing 効果により、ビーム孔先端部では気化が活発となり、蒸気圧力も大きくなる。その大きな圧力により周囲の溶融金属を吹き飛ばすスプラッシュ現象が起こるものと考えられる。したがって、中心付近でのビーム強度の大きいガウス分布のレーザー光は穴あけ加工や切断加工に有利となる。

この様なスプラッシュにおいては、加藤ら¹⁰⁾が高速度撮影でとらえているように、多量の溶融金属が一度にスプラッシュされるのではなく、少量の金属が間欠的に何度もスプラッシュされて、除去層が形成される。この場合、1回に除去される量と除去の繰り返し頻度は、材料により異なる。熱伝導率が大きく、融点が高いAlの場合には大きな溶融層とキーホールが形成される。そして、Fig.9に示されているように、

溶融層の底部付近に発生した大きな蒸発圧力により、多くの溶融層が除去される。この場合の繰り返し周期は大きく、繰り返し数は小さい。しかし、熱伝導率の小さいSUS304の場合には、固相面付近が加熱され、その部分の温度は局部的に上昇する。そのため、溶融層が余り成長しないうちに除去される。したがって、このような場合の1回の除去量は少なく、繰り返し頻度は多くなる。

これらの現象は試料裏面から通過してくる通過レーザー光の強度変化に現れるものと推定される。つまり、ビーム孔先端部で蒸発圧力が増加し、スプラッシュにより溶融金属が除去されると通過レーザー光の強度は増加する。しかし、スプラッシュにより蒸発圧力が解放されると壁面に付着していた溶融金属は重力により垂れ下がり、ビーム孔の直径は小さくなり、通過レーザー光の強度は減少する。このように、スプラッシュの発生周期に対応して通過レーザー光の

Fig.11 Examples of wave forms of re-
flected laser lights (upper) and
transmitted laser lights (lower).

強度も変化すると考えられるので、通過レーザー光の観察を行い、その結果をFig. 11に示す。同図の下側の波形は通過レーザー光の変化をAlとSUS304について示したものである。同図(a)のAlの場合には約0.4msの周期で振幅は大きく変化している。これに対し、同図(b)のSUS304の場合には約0.07msの周期で振幅は変化しているが、その振幅変化は小さい。つまり、Al

Fig.12 Changes with time of melt zone and removed zone in each power density.

Fig.13 Models of change with time of melt zone and removed zone in each power density.

の場合には0.4ms毎に多量の溶融層を除去しているのに対し、SUS304の場合には0.07ms毎に少量の溶融層が頻繁に除去されているのがわかる。

2.4 加工プロセスのまとめ

以上、加工プロセスを固相、液相、気相の状態で照射時間とパワー密度により検討してきた。一方、前報における各種金属の溶融・除去特性の実験結果からもわかるように、照射時間により、加工深さは変化する。その一例を Fig.12 に示す。このような傾向は各種金属についても認められるものであるから、これらを基にして加工深さの時間変化を模式的に示したものが Fig.13 である。同図 (a) は低パワー密度での溶融プロセスを示したものである。レーザー照射開始後、時間 τ_{f0} で試料表面の溶融が始まる。その後は V_f の速度で溶融深さは増加する。しかし、 τ_{fc} 以降は吸収されたレーザーエネルギーと溶融層界面から固相へ熱伝導により失われるエネルギーやビーム孔を保持するため蒸発に消

費されるエネルギーとが平衡状態となり、溶融層深さは一定となる。

同図 (b) は溶融と除去の混合プロセスの領域であるが、パルス幅、つまり、レーザー照射時間が τ_{v0} の前までは、溶融プロセス領域にある。レーザー照射開始後 τ_{v0} で溶融層表面に除去層が形成され始め、 V_v の速度で除去層深さが増加する。 V_v と V_f の違いにより加工状態が異なってくる。時間 τ_{vc} では除去層深さ h_v でのパワー密度が除去限界パワー密度以下となり、その後は除去層深さ h_v は一定となり、ビーム孔径の拡大、縮小を繰り返しながら、その中をレーザー光は進み、溶融層のみが増加する。

しかし、時間 τ_{fc} では深さ (h_v+h_f) でのパワー密度が溶融限界パワー密度となり溶融層深さも一定となる。その後は吸収されたエネルギーと固相界面から熱伝導で失われるエネルギーとは平衡状態を保ち、周囲に熱影響層のみを拡大する。したがって、レーザー照射時間を必要以上に長くしないことが肝要である。

同図 (c) は高パワー密度での加工の進行状態を示したものである。 τ_{vc} までは除去プロセスに相当する。レーザー照射直後から除去層のみが形成され、加工速度 V_v で除去層深さが増加する。照射時間が τ_{vc} になると加工穴底面でのパワー密度が除去限界パワー密度以下となり、除去層深さは一定となる。その後は溶融層深さのみが増加する。しかし、照射時間が長くなると前述のように溶融層深さも一定となる。

このように、加工穴深さの増加とともに Wall-Focusing 効果による多重反射や加工穴中の蒸気による散乱によりレーザー光は減衰するため、加工点でのパワー密度は減少することが明らかとなった。そこで、実際に穴あけされた加工深さから減衰率を算定する。

試料表面でのパワー密度 W_0 は加工深さ h の増加とともに指数関数的に減少するものと仮定する。加工穴底部でのパワー密度が除去限界パワー密度 W に達した時に、加工深さは一定となる。この時の減衰割合を減衰率 α とすると、次式が成立する。

$$W = W_0 \cdot \exp(-\alpha h) \quad (1)$$

式(1)を用いて、Alの減衰率を求めることにする。加工特性の実験により除去限界パワー密度は $W = 50 \text{ kW/mm}^2$ となっているので、各照射パワー密度と加工深さとの関係より減衰率を求めると次のようになる。

W_0	h	α
80	1.3	0.53
90	1.9	0.43
100	2.2	0.42
110	2.5	0.40
120	2.9	0.38

このように、ほぼ一定の値が得られたので、Alの減衰率 α を 0.4 mm^{-1} とする。

3. 材料除去のメカニズム

レーザー光による加工穴の形成は、溶融体除去と気体除去により起こる。しかし、それらの割合やその時の温度について妥当な考えは余り示されていなかった。吉岡ら¹¹⁾はレーザー加工と類似の加工メカニズムを示す電子ビーム加工において、周囲の要素の温度が修正融点に達すると、その中心の要素は除去されるものとして計算を行っている。しかし、そこでは気化の概念は考慮されていない。

そこで本項では、気化の概念を取り入れた要素除去の決定法について述べる。Fig. 14は密度 ρ と比熱 c との積 $\rho \cdot c$ の温度変化をAlについて示したものである。これを数式で示すと次のようになる。

$$\begin{aligned} \rho \cdot c(T) &= 2.40 + 0.00106 T & T < 660 \\ \rho \cdot c(T) &= 2.71 + 0.000206 T & 660 \leq T \leq 2000 \end{aligned} \quad (2)$$

一方、固体の各温度で保有するエネルギーは次のようにして求められる。

$$Q_1(T) = \int_0^T \rho \cdot c(\theta) d\theta$$

Fig. 14 Dependency of $\rho \cdot c$ and $\rho \cdot c \cdot T$ on temperature (ρ : density, c : specific heat, T : temperature)

$$= 2.4 T - 0.000103 T^2 \quad T \leq 660 \quad (3)$$

同様に、液体の各温度で保有するエネルギーは $Q_f (= 1080 \text{ J/cm}^3)$ を溶融潜熱として、次式のようになる。

$$\begin{aligned} Q_2(T) &= Q_1(660) + Q_f + \int_{660}^T \rho \cdot c(\theta) d\theta \\ &= 966 + 2.71 T - 0.000103 T^2 \\ & \quad 660 < T < 2000 \end{aligned} \quad (4)$$

式(3)、式(4)及び気化潜熱 $Q_v = 29340 \text{ J/cm}^3$ を $\rho \cdot c \cdot T$ の変化として Fig. 14 に示してある。溶融体を融点から沸点まで加熱するのに必要なエネルギーは 3260 J/cm^3 である。この値は気化潜熱の約10%にすぎない。したがって、溶融体として除去される場合でも、その要素は沸点まで達していると思なすことができる。

次に、溶融体除去と気体除去との割合について検討する。Fig. 14を基に温度とその温度で保有しているエネルギーとの定性的な関係を Fig. 15に示す。ここで、

$$Q_1 = c \cdot \rho \cdot T_v + Q_f \quad (5)$$

$$Q_2 = Q_1 + Q_v \quad (6)$$

Fig.15 Energy in each temperature.

で示される。 c : 比熱 ($\text{J/g} \cdot \text{deg}$), ρ : 密度 (g/cm^3), T_v : 沸点, Q_f : 溶融潜熱 (J/cm^3), Q_v : 蒸発潜熱 (J/cm^3)

加工断面形状がほぼ除去層のみの場合について、以下に定義する除去エネルギーを検討する。

$$Q_r = \frac{E}{V_r} \quad (7)$$

ここで, Q_r : 除去エネルギー (J/mm^3), E : 照射エネルギー (J), V_r : 除去層体積 (mm^3) である。次に,

P_f : 沸点において, 溶融金属として除去される割合

P_v : 沸点において, 気化金属として除去される割合 (気化率)

とすると,

$$Q_1 \cdot P_f + Q_2 \cdot P_v = Q_r \quad (8)$$

$$P_f + P_v = 1 \quad (9)$$

となるから式(8)と式(9)より, 気化率は

$$P_r = \frac{Q_r - Q_1}{Q_2 - Q_1} = \frac{Q_r - Q_1}{Q_v} \quad (10)$$

となる。これは沸点に達した溶融金属が気体となって除去される割合を示す。以上の関係式を用いて, Alの気化率を以下により検討する。

加工特性の実験結果より, ほとんどが除去層のみの断面形状より除去エネルギー Q_r を求め, パワー密度との関係で示したのが Fig.16 である。実験を行った範囲内では, $Q_r = 14 \sim 20 \text{ J/mm}^3$ とほぼ一定の値を示している。Alにおいて

Fig.16 Relationship between power density and energy for removal.

は $Q_1 = 6.1 \text{ J/mm}^3$, $Q_v = 29.3 \text{ J/mm}^3$ であるから, これらを式(10)に代入すると気化率は約40%と算出される。このことは, 沸点まで達した要素が気化潜熱の約40%を吸収すると除去されることを示している。

4. 結 言

レーザー加工においては, 相変化やブルームの発生があり, 加工現象が複雑となっている。本報ではレーザー加工メカニズム解明の基礎的検討として, 加工プロセスの分析と除去のメカニズムの検討を行い, 得られた結果をまとめて以下に示す。

- (1) 加工プロセスを熱伝導プロセス, 溶融プロセス, 溶融と除去の混合プロセス及び, 除去プロセスに分類して検討した。この結果, 照射時間とパワー密度によって, これらの加工状態は決定され, 加工条件を設定する場合の目安となる。
- (2) 照射レーザー光のパワー密度は加工深さの増加とともに減衰する。加工実験の結果を基にその減衰率を推算した。
- (3) 材料除去には溶融体除去と気体除去があり, 気体除去の割合を気化率として定義した。加工実験の結果を基にAlの気化率は40%として推算された。

本研究を遂行するに当り、貴重な御助言をいただいた東京大学生産技術研究所第2部教授佐藤壽芳博士、(株)ソルテック、研究所長池田正幸博士に、厚く御礼申し上げます。又、データの整理に協力いただいた千葉大学卒業生森田 昇、千葉 明の各氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) T. Miyazaki et al: Annals of the CIRP **22** (1973) 67.
- 2) R. E. Wagner: J. Appl. Phys. **45** (1974) 4631.
- 3) K. C. A. Crane et al: J. Appl. Phys. **51** (1980) 5954.
- 4) Y. Arata et al: Electron Ion Beam Soc. Technol. 7th (1976) 111.
- 5) 荒田, 丸尾, 宮本, 竹内: 高温学会誌 **5**, 2 (1979) 101.
- 6) 吉田, 荒井: 電気加工学会誌 **7**, 13 (1972) 1.
- 7) 渡部, 吉田, 志茂: レーザー研究, **15** (1987) 1073.
- 8) 渡部, 吉田, 志茂: レーザー研究, **16** (1988) 252.
- 9) 荒田, 宮本: 溶接学会誌 **41** (1972) 425.
- 10) 加藤, 高増, 大園, 植村: 昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会論文集 (1983) 105.
- 11) 吉岡, 宮崎: 精密機械, **48** (1982) 1028.